

VALIDACIÓN DE MODELOS DE ELEVACIÓN DIGITAL EN LOS ANDES CENTRALES DE CHILE

VALIDATION OF DIGITAL ELEVATION MODELS IN THE CENTRAL ANDES OF CHILE

Sr. Diego A. Soza¹ y Sr. Daniel Falaschi^{2,3}

RESUMEN

Este estudio validó la precisión y exactitud vertical de siete modelos de elevación digital DEM (SRTM X-SAR, SRTMv3 void filled 1 arcsec, SRTMv3 void filled 3 arcsec, SRTM GL1 Ellip, Aster GlobalDEM v3 2019/08, Alos World 3D 30m v21 2018/04, TamDEMx), a escalas regional y local en zonas de media y alta montaña de los Andes centrales de Chile. La precisión fue determinada utilizando pruebas estadísticas compiladas por el Instituto Nacional de Normalización (INN), las que consideraron datos de elevación de 149 puntos de control terrestre con mediciones GNSS y 1825 PCT de la misión IceSat-2. A escala regional, los resultados del error entre el valor observado y el valor estimado, indican que el DEM SRTM X-SAR es el de mayor exactitud y precisión vertical (exactitud= 21,3 m equivalente al 85%; RMSEz=21,7 m equivalente al 86,8% de precisión). Sin embargo, su configuración en bandas cruzadas no permite cálculos que aseguren la completitud de un área mayor a 2.500 km². Entonces, la siguiente opción es el DEM Alos World 3D 30m v21 2018/04 con exactitud de 22,5 m equivalente al 90%; RMSEz=23 m equivalente al 92%). A escala local y, considerando primero toda el área y todos los datos IceSat-2 y luego solo aquellas mediciones en zonas estables, el DEM Alos World 3d es el de mayor precisión y exactitud vertical, seguido del DEM AsterGDEMv3 19/08. En último lugar se ubica el DEM TamDEMx.

Palabras clave: DEM, precisión vertical, misión IceSat-2, GNSS, Andes centrales.

ABSTRACT

This study validated the vertical exactitude and accuracy of seven digital elevation models DEM (SRTM X-SAR, SRTMv3 void voided 1 arcsec, SRTMv3 void filled 3 arcsec, SRTM GL1 Ellip, Aster GlobalDEM v3 2019/08, Alos World 3D 30m v21 2018/04, TamDEMx), considering both regional and local scale in middle/ higher mountain areas of the central Andes of Chile. Exactitude and Accuracy were determined using metrics and/or statistical tests reviewed by the National Institute of Standardization (INN), tests that considered the elevation data of 149 ground control acquired through several GNSS surveys, and 1825 gcp provided by IceSat-2 mission records. At the regional scale, the results of the error estimation between the observed and the predicted value indicate that the DEM SRTM X-SAR is the most precise and vertically accurate set (21,3 m of exactness equivalent to 85% of exactitude; RMSEz = 21,7 m of precision equivalent to 86.8% of accurate). However, the band layout does not allow calculations that ensure the completeness of an area greater than 2500 sqkm. Then, the next option is the DEM Alos World 3D 30m v21 2018/04 (22,5 m of exactness representing 90% of exactitude; RMSEz = 23 m equivalent to 92% of accurate). Locally, and first considering the entire area and all IceSat-2 data, and then only those measurements in stable zones, in both cases the Alos World 3d is the most exactly and vertically accurately DEM, followed by the DEM AsterGDEMv3 19/08. The poorest indicators belong to the DEM TamDEMx.

Keywords: DEM, vertical accuracy, IceSat-2 mission, GNSS, central Andes.

¹ PraxisGeomática, Caldas 365, Santiago, Chile.

² Instituto argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA). CCT Mendoza-CONICET, Argentina.

³ Departamento de Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza, 5500, Argentina.

Fecha de recepción: 10 de julio de 2020

Fecha de aprobación: 15 de octubre de 2020

INTRODUCCIÓN

Las zonas remotas de alta montaña son de difícil acceso, ya sea por la distancia, el alto coste de insumos como instrumentos y operadores humanos, y/o la compleja logística de los medios de aproximación (Leidman et al., 2020). La teledetección satelital aplicada permite la aproximación remota a zonas complejas al reducir los riesgos del trabajo en terreno (Hubbard y Glasser, 2005; Burchfield et al., 2020; Enßle, Fritz y Koch, 2015; Sulzer y Kostka, 2007). Los datos de elevación en zonas de alta montaña tienen múltiples aplicaciones: desde estudios de la criósfera de áreas glaciadas o entornos periglaciares, al dinamismo y la estabilidad de las geoformas y el riesgo de actividades antrópicas por factores naturales (Tedesco, 2015; Kargel et al., 2014). El formato predilecto para disponer los datos es el modelo de elevación digital MED o DEM (Croneborg et al., 2015) una superficie continua interpolada desde una nube de puntos “ndp” con valores xyz obtenida por instrumentos y técnicas diversas. La ndp clasificada puede generar dos subproductos: DTM o modelo digital de terreno que incluye los elementos sobre la superficie, y DSM modelo digital de superficie que excluye los elementos sobre la superficie (Jedlicka, 2009). En general, un DTM tiene menor precisión vertical que un DSM, y las zonas de alta montaña corresponden a DSM pues no existen elementos sobre la superficie del terreno (BigData Earth, 2017). ¿Por qué es importante conocer la exactitud y precisión de un DEM? Primero, la precisión es el indicador más importante de la calidad de éste, y la exactitud una métrica del error (INN, 2014). Segundo, se debe contar con una referencia vertical que permita la ejecución de pre/postprocesos de datos ópticos y multispectrales. Tercero, se hace compleja la medición de referencias GNSS en zonas agrestes.

Entonces, es fundamental saber cuál es la mejor fuente disponible de datos altimétricos de acceso libre y gratuito. El objetivo de este trabajo es validar la exactitud y precisión vertical de siete DEM a nivel regional y local en los Andes centrales de Chile, cualidades estimadas a partir de los datos de puntos de control GNSS y ICESat-2 a través de indicadores y pruebas estadísticas de acuerdo a los estándares chilenos de calidad de información geográfica. En la primera parte del documento se contextualiza al lector sobre la referencia vertical aplicable al territorio nacional, tipos de altura y su relación, y los conceptos de precisión y exactitud.

Luego, se describen los materiales y métodos considerados en esta investigación. En los resultados, se caracterizan a escala regional y local los DEM y muestras de puntos de control, y se comparan los indicadores que respaldan la elección de la mejor opción entre los DEM comparados. Finalmente, se entregan las conclusiones y una breve discusión.

MARCO CONCEPTUAL

Referencia vertical y alturas.

El Instituto Nacional de Normalización INN y el Sistema Nacional de Información Territorial SNIT han publicado Normas y Documentos técnicos que dibujan un marco conceptual y operacional de la Geodesia aplicable a la producción de información geográfica del territorio nacional (Tarrió Mosquera, Aravena Ramirez y Silva Valdicia, 2017; SNIT, 2018). El documento técnico del MOP “Manual de Carreteras MC Vol. 2” describe los procedimientos estandarizados de un estudio de ingeniería en el territorio de Chile; en éste se indica que toda medición de una posición de las coordenadas xyz en un tiempo dado debe considerar una referencia horizontal y vertical, asumiendo un Sistema de Referencia (SR) y su materialización de un Marco de Referencia (MR) (2018, p. 110; INN, 2016). Para la componente vertical la materialización local de un MR construye un Datum Vertical cuyos parámetros están dados por el nivel medio del mar (n.m.m.) y referidos a un Geoide, y para la componente horizontal a través de un Datum horizontal (SNIT, 2018). La determinación de alturas ortométricas o geoidales H se hará en el continente tomando como referencia un vértice de una Red Geodésica o en ausencia de este, a partir de un pilar de nivelación del Instituto Geográfico Militar de Chile (IGM, 2018). Cuando estas dos fuentes no estén disponibles, es posible estimar la altura n.m.m. usando modelos geoidales. Ya sea por las mediciones GNSS en superficie, o las coordenadas obtenidas por un receptor GPS L1, en IMU en L1/L2 satelital, conocemos las alturas elipsoidales h . Tal como se muestra en la figura 1, una superficie geoidal se relaciona con una superficie elipsoidal a través de una referencia vertical y su “ondulación geoidal” denominada “ N ”, la que a su vez representa en un punto la altura del geode respecto del elipsoide (MOP, 2018). El valor

de “N” se puede obtener mediante la aplicación de modelos matemáticos del geode, o bien de la extracción puntual a partir de las grillas existentes en la mayoría de los softwares de procesamiento GNSS. SNIT (2018, p. 29–33) recopila los modelos geoidales validados para Chile, señalando como la fuente más confiable y rigurosa para acceder a ellos al Centro Internacional de Modelos Globales de la Tierra⁴.

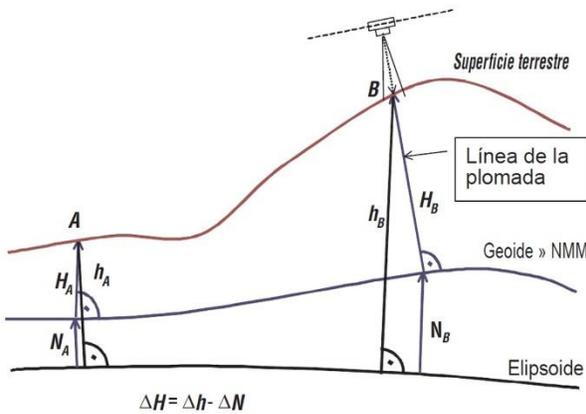


Figura 1 Superficies de referencia. Extraída de “MC.Vol2 Cap. 2.300 figura 2.305.304.A”.

Error, exactitud y precisiones.

Conclusiones de revisiones metodológicas y validaciones globales y locales de productos DEM, sugieren que todo DEM tiene un error inherente en su generación (Kargel et al., 2014; Jedlicka, 2009; Hawker et al., 2018). Usualmente, un distribuidor de productos DEM que busca hacer comparable su dato, declara: la exactitud posicional como una métrica del error, y la precisión -que puede ser absoluta o relativa- como el indicador más importante de la calidad posicional de un DEM. Sin embargo, un dato DEM puede ser exacto pero no preciso (INN, 2016). La precisión vertical y horizontal de un DEM está determinada por: variadas configuraciones morfométricas del terreno, el tipo de cobertura superficial, la resolución horizontal del DEM, si es DTM o DSM, y el número de observaciones evaluadas (BigData Earth, 2017). Sin duda lo anterior dificulta la comparación entre DEM en diversas regiones montañosas y puede explicarse por: a) aquellas descripciones incompletas respecto del origen del error posicional, y b) la traducción de terminología

y métricas diversas provenientes de normas internacionales que se adaptan sin cambios a realidades locales. Luego, los valores de precisiones absolutas atribuibles a un DEM sólo son comprobables cuando el usuario puede coleccionar puntos de control (PCT) con un sistema GNSS (Kääb en Pellika y Rees, 2011; Linder, 2016). Entonces y en ausencia de PCT, la precisión solo se puede estimar de manera relativa (de França, Penha y de Carvalho, 2019). Se habla de precisión relativa cuando se comparan los valores de altura obtenidos de DSM con diferente tamaño de pixel, usando puntos de verificación que representen toda la diversidad de coberturas, formas del relieve y posiciones en el terreno (Alganci, Besol y Sertel, 2018; Croneborg et al., 2015). Entonces, la calidad posicional absoluta de un DEM se verifica entre otros métodos, con pruebas estadísticas (Lakshmi y Yarrakula, 2018; Höhle y Höhle, 2009). Entre las pruebas de postproceso que controlan la calidad de los productos de elevación, destacan aquellas que han sido ejecutadas en estudios de validación a escala global/local y que para Chile fueron compiladas en la Norma de calidad sectorial vigente (NCh-ISO 19157:2014), a saber: la prueba estadística de la ASPRS (2015) y la prueba NSSDA (FGDC, 1998a), ambas generadas en USA y por ello considerables como Normas de referencia (INN, 2016). En el caso de la exactitud una prueba calcula un indicador adimensional del sesgo de una estimación -incertidumbre- en base a un porcentaje de confianza a una resolución estimada, y de la toleración máxima y mínima esperable para ésta (INN, 2014; ASPRS, 2015). Para la precisión, se trata de un indicador del error absoluto en la unidad de medida de la resolución espacial de los datos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Las características de los DEM considerados en este ejercicio se muestran en la tabla 1.

	Id DEM	alt.	elips. ref.	geoid. ref.
A	SRTM X-SAR	e.	WGS84	na
B	SRTMv3 filled 1 arcsec	void o.	na	EGM96
C	SRTMv3 filled 3 arcsec	void o.	na	EGM96

⁴ <<http://icgem.gfz-potsdam.de/home>>

D	SRTM GL1 Ellip	e.	ITRF96	na
E	Aster GlobalDEM v3 2019/08	o.	na	EGM96
F	Alos World 3D 30m (AW3D30) v21 2018/04	o.	ITRF97	na
G	TamDEMx	e.	WGS84-G1150	na

Tabla 1. Fuentes de datos DEM (continúa). Donde, alt.=altura; ref.=referencia; e.= elipsoidal; g./geoid.= geoid; na = no aplica.

id	adq.	prec.hoz.abs [m]	prec.vert.abs [m]	aj.geo
A	0002 11	±15 (rel.) : ±20 (*)	±6 (rel.) : ±16 (**)	no
B	0002 11	<10 (*)	<10 (**)	si
C	0002 11	<10 (*)	<10 (**)	si
D	0002 11	<10 (*)	<10 (**)	no
E	2000- 13	±3 (***)	≥7 (****); - 5,58 : +15,45, σ _{med} +7,4	si
F	2006- 11	ni	<5	si
G	1403 04	<10 (*)	<10 (**)	no

Tabla 1. Fuentes de datos DEM (continúa). Donde adq.= fecha/período de adquisición en [aamddd]; prec. = precisión; hoz.= horizontal; vert. = vertical; abs. = absoluta; geo. = geoidal; (*) = CE90 error circular al 90%; (**) = LE90 error lineal al 90%; (***) = ATB; (****) = con GCP, no GCPS <10m; σ_{med}= media de la desviación estándar.

id	descarga	misión (plattf.)
A	DLR-EOWEB-NG	
B	USGS-Earth Data	STS-99
C	USGS-Earth Explorer	(S.S.Endeavour)
D	OpenTopography	

³ Para conocer las características de los productos de ICESat-2, consultar la url <<https://icesat-2.gsfc.nasa.gov/science/data-products>>

E	NASA LP DAAC	Aster (Terra)
F	JAXA-EORC	ALOS-1 Daichi
G	DLR-EOC	TDM-1 (TSX;TanDEMx)

Tabla 1. Fuentes de datos DEM (continúa). Donde plattf. = plataforma;

id	sensor (método)	referencia
A	SM/dInSAR Banda X	DLR (2018)
B	SM/dInSAR Banda C	LP DAAC (2015)
C	SM/dInSAR Banda C	LP DAAC (2015)
D	SM/dInSAR Bandas C y X	Farr et al. (2007)
E	VNIR (mapeo triestéreo)	Tachikawa (2015); NASA-METI Sc. Teams(2019); Japan Space Systems (2019)
F	Prism (mapeo triestéreo)	Tadono et al.,(2016); EORC (2019); Jaxa
G	SAR Banda X (BS/WS)	Wessel (2016)

Tabla 1. Fuentes de datos DEM (concluye).

La misión ICESat-2.

Lanzada en septiembre de 2018 la plataforma satelital "Ice, Cloud and land Elevation Satellite-2" ICESat-2 porta el instrumento "Advanced Topographic Laser Altimeter System" (ATLAS)³: un láser satelital de luz IR verde de 532 nm que emite pulsos de luz con una frecuencia de 40 Hz, formado por 3 pares de haces, y donde cada par tiene dos canales (uno izquierdo y otro derecho), permitiendo el conteo de fotones y el cálculo del tiempo de retorno del pulso en el sentido de avance del satélite (Smith et al.,2019). El instrumento de navegación inercial "Laser Reference System LRS" determina la dirección absoluta de la emisión laser, mientras que los receptores GPS determinan la posición en tiempo real en el espacio en un área de ~5 m (Neumann et al., 2019; Markus et al., 2017).

Los productos de ICESat-2 tienen tres versiones, y se codifican de acuerdo a sus características en ATL03, ATL07, ATL08, ATL10, ATL12 y ATL13. De esta gama el ATL06 *Land Ice Height* entrega valores de altura superficial del hielo clasificadas desde las alturas geolocalizadas en el tiempo y calculadas en los fotones captados por el instrumento ATL03, datos acompañados de parámetros adicionales para interpretar la calidad de éstos (Smith et al., 2019; Smith et al., 2020). Un archivo ASCII (csv) agrupa rutas (*tracks*) y haces (*beams*), donde cada par está a ~3,3 km del otro par, y dentro del par los canales están a ~90 m de distancia, y cada pulso a un promedio de ~17 m de separación (Smith et al., 2019). Estimaciones del sesgo potencial equivalente a la desviación estándar simulada (*Rbias*), sugieren que para los haces de mayor precisión a los 30° de latitud Sur el error varía entre 0,52-0,58 cm (Markus et al., 2017). Respecto de la calidad de los datos, Smith et al. (2019) estimó para un glaciar subártico de Groenlandia un sesgo del parámetro $h_{li_sigma}^4$ con una media de 0,1 m y RMS de 0,14 m, valores que se reducen a rangos sub-centrímetros con RMS 0,09 m al extraer los valores anómalos (*outliers*), límites en cualquier caso aceptables por debajo de las simulaciones, pero que no aseguran que esta precisión sea esperable en una topografía abrupta de alta montaña. A la fecha de este artículo aún no han sido publicados reportes oficiales de precisión y exactitud (Blokker, 2019).

ÁREAS DE ANÁLISIS

Para estimar la precisión y exactitud de 7 DEM se consideró un área regional y un área local (ver figura 2). El área regional corresponde a la superficie de 19.284 km² repartida entre las cuencas de los ríos Mapocho, Maipo y Rapel ubicadas en las regiones 13 y 6, en las unidades del piedemonte andino y la alta montaña de los Andes centrales de Chile, cuyo rango de alturas varía entre 242 y 6.568 m. El área local corresponde al polígono que incluye al glaciar Gran Cachapoal ubicado en la región 6 de Chile (-70,04;-34,30) en la cabecera de la cuenca del río Rapel, cuya superficie de 125 km² equivale al 0,7% del

área regional. Es un zona de alta montaña con 2.963 metros de rango altitudinal, mayormente glaciada y de superficies con pendientes con gran inclinación y evidencias de inestabilidad de laderas (Charrier et al., 2019). Diversos autores recomiendan algunos procedimientos de ajuste, que a su vez permiten anular las diferencias de alturas con valores extremos, que pudieran explicarse por la ocurrencia de eventos geodinámicos en zonas inestables o bien por el control de la pendiente. Una zona inestable es aquella superficie cubierta de nieve, hielo, suelo congelado y cuerpos de agua, y pendiente inclinada (Nuth y Kääb, 2011; Pitte et al., 2016; Berthier et al., 2007). Luego, el área estable es aquella que no presentaría grandes cambios en el tipo de cobertura ni en su altura superficial, y que en este caso usualmente corresponde al entorno periglacial sin cobertura de hielo, nieve, permafrost o cuerpos de agua, en pendiente menor a 12° que puede asociarse a afloramientos rocosos planos (Purinton y Bookhagen, 2018; Nuth y Kääb, 2011; Berthier et al., 2006). Usando índices normalizados calculados en imágenes multiespectrales del año 2019 de las misiones Sentinel 2A, Planet y GeoEye, con apoyo del relieve sombreado y el soporte de inventarios de glaciares de años anteriores (DGA, 2011), se dibujó el contorno del glaciar Gran Cachapoal y sus coberturas superficiales junto a otras clases de superficies. De este proceso se obtuvo el archivo vectorial "mask_1_on_UNSTABLE.shp", polígono utilizado para la sustracción sobre la capa "data_clip.shp", obteniéndose una máscara de la zona estable "mask_1_on_STABLE.shp" que alcanza 8,3 km² equivalentes a 6,6% del área local.

Puntos de control.

Para la estimación regional de la precisión y exactitud vertical, se construyó una base de datos que contiene los valores de elevación de la superficie (del terreno) de 149 puntos de control terrestre, en adelante PCT, medidos con un sistema GNSS en modos estático/dinámico. Los puntos seleccionados fueron recopilados de estudios y/o publicaciones de acceso público y gratuito, cuya lista de referencias no se incluye en

⁴ h_{li_sigma} es el indicador de la incertidumbre de la altura del hielo superficial equivalente al error de la altura superficial provocado por errores en los rangos de escaneo. h_{li} es la altura del hielo superficial para el producto ATL06, y se calcula con la fórmula $h_{li} = h_{mean} + tx_{med_corr} + fpb_{med_corr}$,

donde h_{mean} es la altura del segmento central del ajuste lineal, tx_{med_corr} es la corrección del pulso transmitido, y fpb_{med_corr} es la corrección del sesgo del primer foton.

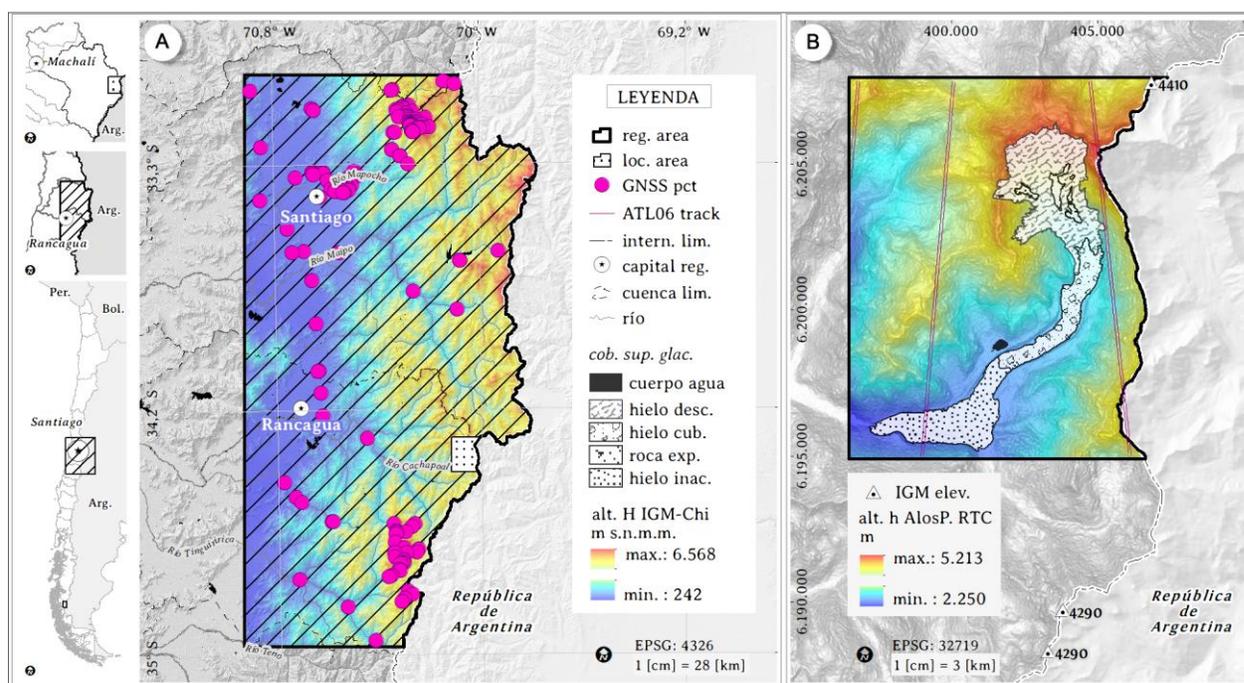


Figura 2 Área de estudio.

este documento por su extensión. Los puntos seleccionados cumplieron con las condiciones de: mediciones en zonas rurales y abiertas, en zonas de media o alta montaña, y posterior a febrero de 2010 -fecha del último evento sísmico cuya magnitud explique cambios en la altura superficial por desplazamiento. Esta es la muestra 1. Para la estimación local, desde el sitio Open Altimetry se descargaron los archivos .csv de los tracks id 1.131 y 1.276 del producto ATL06, con mediciones del 22 de marzo de 2019 de la altura superficial elipsoidal (h), referidas al Datum horizontal ITRF2014 y al Datum Vertical y el elipsoide de referencia WGS84 (Neumann et al., 2019). Estos 1.825 PCT se integraron en una base de datos que contiene los valores de elevación de la superficie (del terreno), para construir la muestra 2. Desde la muestra 2, se extrajo una muestra 3 formada por 49 PCT del área local ubicados en las zonas estables.

En la figura 2, a la derecha A) el área regional las alturas superficiales ortométricas H fueron interpoladas usando datos IGM 1:50.000 de las secciones E y F, el sombreado de relieve de gsd = 12,5 m fue construido con datos ALOS PALSAR RT1/RTC-FBS (2006/10/14). A la izquierda B), el área local muestra las alturas elipsoidales del gránulo "AP_03837_FBS_F6480_RT1" de ALOS-1 Daichi, obtenidos desde Vertex-ASF; las

coberturas superficiales del inventario glaciar a partir de imágenes Hycon capturadas en 1955/02/24, son de autoría de Soza, D. (no publicadas). El límite internacional es el publicado por la Dirección de Fronteras y Límites DIFROL (2018/06/04).

Extracción y ajuste de datos.

Liu et al (2019) analiza la calidad de 4 de los 7 DEM globales de acceso abierto considerados en este trabajo y evalúa como referencia de altura datos GNSS y de IceSat-1, en una amplia sección de los Himalayas y con un rango de alturas y topografías muy similares a las áreas del piedemonte y los Andes centrales de Chile, lo que justifica la adaptación de algunas tareas para nuestros objetivos. A nivel regional y usando los PCT de la muestra 1, en ArcGis 10.5 y mediante la herramienta "Spatial Analyst Tools/Extraction/Extract MultiValues points" configurada con interpolación bilinear y un filtro de 3x3, se extrajeron los valores de altura h y pendiente de los 7 DEM. Obtenidos los valores puntuales, y cuando aplicó la condición del ajuste geoidal según indica tabla 1, se utilizó la ecuación para la nivelación de las alturas. Tal como fue advertido el parámetro "N" es necesario para la

reducción de alturas elipsoidales a alturas ortométricas o geoidales sobre el NMM, procedimiento denominado “ajuste geoidal” que se explica por la ecuación (1) de relación de alturas y ondulación geoidal (Dirección de Vialidad, 2018, p. 110; 2016) :

$$h = H + N ,$$

donde h es la altura elipsoidal en metros, H es la altura geoidal y N es el modelo geoidal.

Los procedimientos del párrafo anterior se repiten para los PCT de la muestra 2. Luego, y siguiendo el flujo de trabajo propuesto en Breytenbach (2016) y Patel (2016), se calcula la diferencia de altura de un DEM para un PCT con la ecuación:

$$\Delta h = ((abs(h_{DEM}) - (abs(abs(h_{PCT}))),$$

donde Δh es la distancia total del error vertical, h_{DEM} es la altura del pixel del DEM evaluado, h_{PCT} es la altura registrada en el PCT.

Siguiendo las sugerencias de Kim (2015) sobre la nube de puntos ndp se calculó el rango Inter cuartil IQR para la estimación del límite superior y límite inferior usando el diagrama de Tukey, que permite la determinación del porcentaje de la muestra sin valores anómalos (Grubbs, 1950) con las ecuaciones en Tukey (1993):

$$IQR = Q_3 - Q_1 ,$$

donde IQR es rango intercuartil; Q_3 es el valor del percentil 75 de la $ndp \Delta h$ en metros; Q_1 es el valor del percentil 25 es la $ndp \Delta h$ en en metros.

$$limSup_{YN} = Q_3 + (f_{sup} \cdot IQR) ,$$

donde IQR es rango intercuartil; Q_3 es el valor del percentil 75 de la $ndp \Delta h$ en metros; Q_1 es el valor del percentil 25 de la $ndp \Delta h$ en en metros.

$$limInf_{YN} = Q_1 - (f_{inf} \cdot IQR) ,$$

donde f_{sup} , f_{inf} es el factor superior e inferior respectivamente para un IQR con distribución sesgada para $Q_2 =$ percentil 50 igual a la mediana de la muestra de una variable continua. Los valores corresponden a múltiplos de 1.5 para un intervalo de confianza del 95 % de la muestra de la $ndp \Delta h$ en metros.

Cálculos de la exactitud y precisión.

Para cada punto de control de las muestras 1 y 2, y para los 7 DEM de referencia, se calculan tres indicadores de la precisión: $RMSE_z$, $NRMSE_z$ y $CVRMSE_z$ (ASPRS, 2015; INN, 2016). En los tres indicadores, el valor observado corresponde a la medición en el PCT, y el valor estimado es el valor de altura del DEM. Asumiendo una distribución normal de los errores, el valor de la raíz del error cuadrático medio de Δh $RMSE_z$ se calcula con la ecuación en Mukherjee et al. (2015) :

$$RMSE_z = \sqrt{\sum((h_{DEM} - h_{PCT})^2)/n}$$

La raíz del error medio cuadrático medio $RMSE$ es un indicador que se interpreta por sí solo , y que caracteriza el error de una estimación en la superficie terrestre. De este se derivan:

$$NRMSE_z = (RMSE_z / (Max ((\Delta h)^2) - Min ((\Delta h)^2)))$$

$$CVRMSE_z = (RMSE_z / (Promedio (\Delta h)^2))$$

El error medio (EM) \hat{u} de la muestra se calcula con la ecuación de Höhle (2009):

$$\hat{u} = \frac{1}{n} \sum \Delta h ,$$

donde $n =$ es el número de observaciones Δh de la muestra. El error medio nos indica cuando un conjunto de observaciones de muestra es subestimado (valor negativo) o sobreestimada (valor positivo), y debe ser leído como el sesgo del error de una estimación en relación con RMSE. El error medio absoluto EMA de la muestra (o media del error absoluto de la muestra MAE, en inglés) se calcula con la ecuación de Höhle (2009):

$$EMA (MAE) = \frac{\sum \Delta h}{n} ,$$

la desviación absoluta de la mediana normalizada de la muestra $DAMN$ (NMAD, en inglés) se calcula con la ecuación de Höhle (2009):

$$DAMN = 1.482 * mediana (\Delta h - media(\Delta h))$$

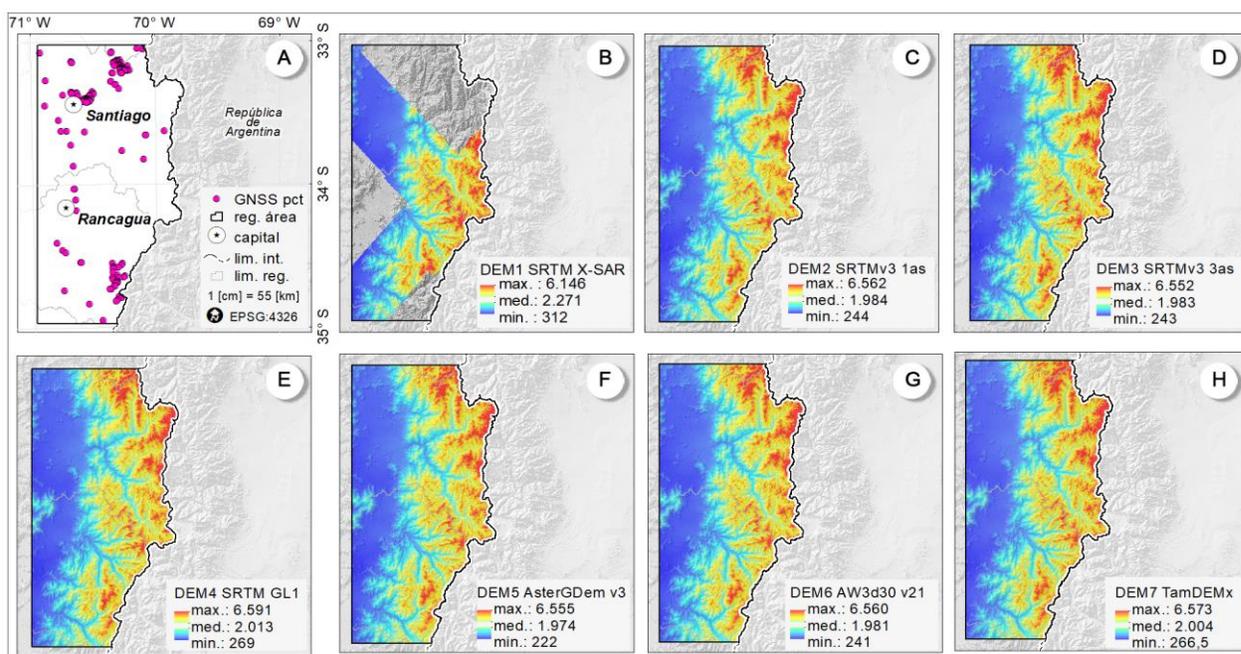


Figura 3 Modelos de elevación digital del área regional. De izquierda a derecha de arriba abajo: “A)” puntos de control GNSS; de “B” a “H” en orden secuencial DEM de la tabla 2 y sus valores mínimos, medios y máximos.

Para estimar la incertidumbre del error de la precisión vertical, se estima la exactitud vertical de un DEM en función del error lineal (LE) al 95% de confianza (LE95) y con un factor equivalente a la mínima precisión, utilizamos la ecuación de FGDC-NSSDA (1998, p. 14) :

$$\text{Exactitud DEM} = 1.9600 * 0.5 * RMSEz$$

Para la estimación de la precisión y exactitud vertical de los DEM en el área local, se repiten los cálculos realizados para el área regional, utilizando las herramientas descritas y las fórmulas señaladas.

RESULTADOS

Caracterización de los materiales.

A escala regional y para los DEM, se calcularon los estadísticos descriptivos agrupados en la tabla 2.

id	gsd	min.	máx.	desniv.	med.	de
A	29	312	6.146	5.834	1.878	1.167
B	27	244	6.562	6.318	1.984	1.264
C	77	243	6.552	6.309	1.984	1.265
D	23	269	6.591	6.322	2.013	1.266

E	25	222	6.555	6.333	1.974	1.263
F	28	241	6.560	6.319	1.981	1.264
G	75	267	6.573	6.306	2.004	1.260

Tabla 2. Estadísticos DEM del área regional. Donde, gsd = *ground sample distance* equivalente al tamaño de pixel del raster; min. = altura mínima; max.= altura máxima; desniv. = rango de alturas; med.= altura media; de = desviación estándar. Todas las alturas son elipsoidales (h) y las unidades en metros. La desviación estándar representa la variabilidad de la altura respecto de una medida de tendencia central, y el mayor valor no explica por si solo si el DEM tiene mayor error o mayor precisión de las elevaciones. Las diferencias en la altura mínima demuestran que el área evaluada no es la misma para todos los DEM.

La figura 3 señala la disposición de los puntos de control, y el rango de las alturas de los modelos de elevación.

Figura 3 Modelos de elevación digital del área regional. De izquierda a derecha de arriba abajo: “A)” puntos de control GNSS; de “B” a “H” en orden secuencial DEM de la tabla 2 y sus valores mínimos, medios y máximos.

A escala local y para los DEMs analizados, se evaluaron los estadísticos descriptivos agrupados en la tabla 3.

id	gsd	min.	máx.	desniv.	med.	de
A	29	2.246	5.222	2.976	3.599	650
B	27	2.217	5.173	2.956	3.571	652
C	77	2.222	5.169	2.947	3.580	652
D	23	2.251	5.206	2.955	3.606	651
E	25	2.208	5.162	2.954	3.564	652
F	28	2.214	5.178	2.964	3.570	652
G	75	2.249	5.174	2.926	3.589	642

Tabla 3. Estadísticos DEM del área local. Todas las alturas son elipsoidales (h) y las unidades en metros.

Como era esperable para el área local respecto del área regional y para todos los DEM, el rango de alturas aumenta, los máximos disminuyen y los mínimos suben, junto a la desviación estándar que tiende a ser la mitad del área más grande. De entre los descriptivos, la desviación estándar “de” es importante cuando la distribución de los datos es normal respecto de una media, determinando una relación paramétrica y directamente proporcional al error. A escala regional, se caracterizó la muestra 1 de los PCT GNSS a partir de los descriptivos resumidos en la tabla 4.

dato	obs. (n)	min	max	media	de
DEM_A	59	419	3.997	1.126	1.001
DEM_B	149	425	5.213	2.283	1.474
DEM_C	149	425	5.110	2.282	1.471
DEM_D	149	422	5.184	2.281	1.474
DEM_E	149	418	5.174	2.273	1.471
DEM_F	149	422	5.187	2.279	1.474
DEM_G	149	415	5.142	2.272	1.470

Tabla 4. Descriptivos de los puntos de control GNSS. Donde, obs. = número de observaciones. Salvo aquellas señaladas como geoidales (H) todas las alturas son elipsoidales (h), y las unidades en metros.

A escala local, se caracterizó la muestra 2 de los PCT IceSat-2 a partir de los descriptivos resumidos en la tabla 5.

dato	obs. (n)	min.	max.	media	de
DEM_A	1.825	2.434	5.199	3.727	586
DEM_B	1.825	2.432	5.195	3.731	590
DEM_C	1.825	2.439	5.180	3.736	585

DEM_D	1.825	2.465	5.228	3.765	588
DEM_E	1.825	2.432	5.184	3.724	589
DEM_F	1.825	2.434	5.205	3.729	591
DEM_G	1.825	2.474	5.211	3.758	585

Tabla 5. Descriptivos de los puntos de control IceSat-2 de la muestra 2.

A escala local y para las zonas estables, se caracterizó la muestra 3 de los PCT IceSat-2 a partir de los descriptivos resumidos en la tabla 6. La figura 4 muestra la disposición de los PCT ICESat-2 de la muestra 2, y el rango de las alturas de los modelos de elevación.

dato	obs. (n)	min.	max.	media	de
DEM_A	49	2.437	5.199	3.689	781
DEM_B	49	2.432	5.195	3.694	786
DEM_C	49	2.445	5.180	3.695	776
DEM_D	49	2.468	5.228	3.729	784
DEM_E	49	2.432	5.182	3.687	785
DEM_F	49	2.434	5.205	3.692	790
DEM_G	49	2.474	5.209	3.717	773

Tabla 6. Descriptivos de los puntos de control IceSat-2 de la muestra 3 de zonas estables. Donde obs. = número de observaciones.

Análisis de las diferencias de alturas.

Los descriptivos de las diferencias de altura Δh (entre el PCT y DEM) en el área regional y en el área local, se muestran en las tablas 7, 8 y 9. La estimación del IQR y los límites inferiores y superiores, permitió calcular el porcentaje de la muestra válida sin valores anómalos para cada DEM. Para analizar la dispersión se graficó la variable Δh en función de la altura h y la pendiente del terreno, los que se muestran en las figuras 5,6 y 7.

Set / Δh	Q1	Q3	IQR	lim.inf	lim.sup	obs.val (%)
A	5,9	29,8	23,9	1,6	47,8	98,0
B	7,0	32,0	25,0	0,0	50,8	96,6
C	8,9	35,5	26,6	0,2	55,5	95,3
D	5,2	29,5	24,3	0,1	47,7	96,0
E	4,3	23,0	18,7	0,2	37,0	90,6
F	4,1	23,9	19,8	0,0	38,8	93,3
G	3,6	28,3	24,6	0,0	46,8	94,6
Prom.	5,6	28,9	23,3	0,3	46,3	94,9

Tabla 7. Descriptivos Δh de la muestra 1 área regional. Donde IQR = rango inter-cuartil = Q3-Q1;

lim.sup. = límite superior de la muestra valida = $(Q3+(0,75*IQR))$; lim.inf. = límite inferior de la muestra valida = $(Q1-(0,75*IQR))$; obs.val. = porcentaje de observaciones válidas de la muestra.

Los descriptivos de las diferencias de altura Δh en el área local se muestran en las tablas 8 y 9.

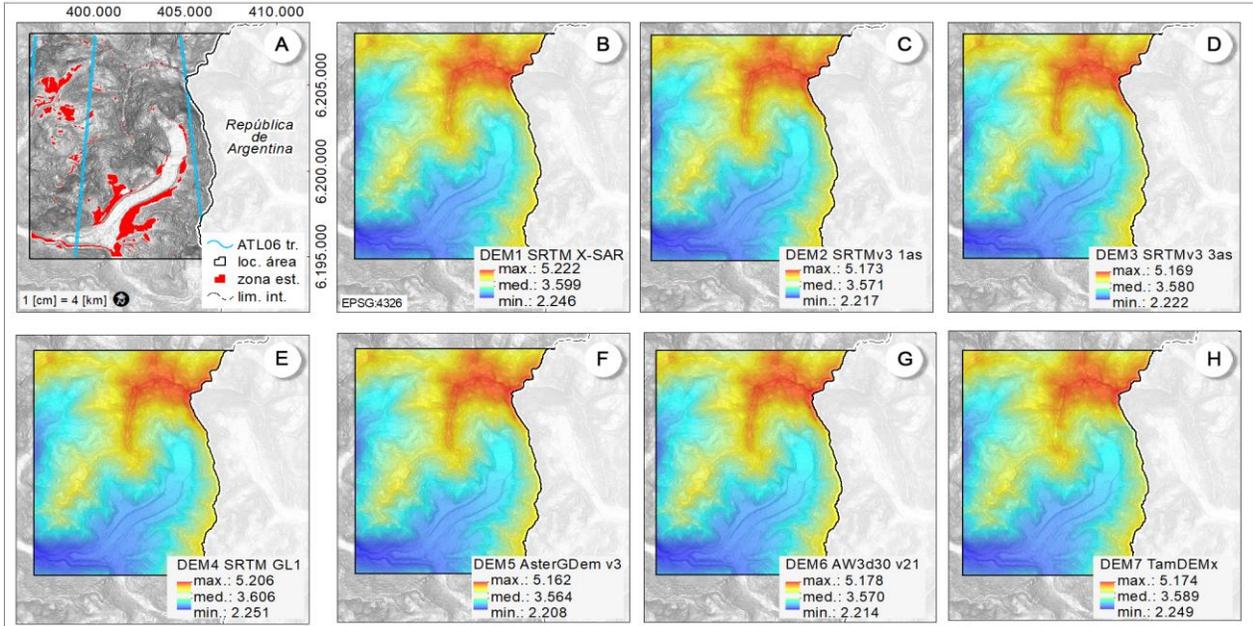


Figura 4 Modelos de elevación digital del área local. De izquierda a derecha de arriba abajo: "A" puntos de control Icesat-2 ATL06 v zonas estables; de "B" a "H" en orden secuencial DEM de la tabla 3 v sus valores

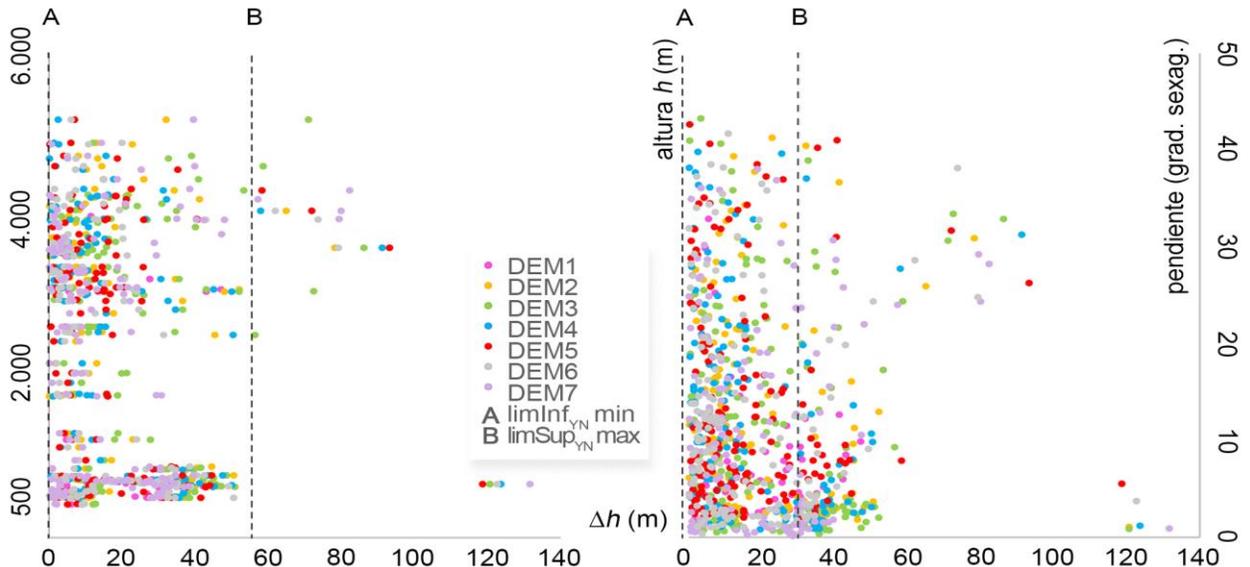


Figura 5 Distribución de diferencias de altura Δh para 7 DEM de la muestra 1 con 149 PCT GNSS. A la izquierda la variable dependiente en la altura h, y a la derecha la pendiente del terreno.

Set / Δh	Q1	Q3	IQR	lim. inf	lim. sup	obs.val. (%)
A	4,1	14,8	10,7	0,0	23,6	85,8
B	5,3	15,8	10,5	0,0	28,0	99,3
C	10,1	31,9	21,8	0,0	32,5	92,7
D	32,6	48,6	16,0	1,4	78,0	73,2
E	4,2	16,2	11,9	0,0	25,0	97,7
F	4,2	14,7	10,4	0,0	22,3	99,0
G	25,9	59,2	33,3	0,1	84,1	56,3
Prom.	12,3	28,7	16,4	0,2	41,9	86,3

Tabla 8. Descriptivos Δh de la muestra 2 área local.

Set / Δh	Q1	Q3	IQR	lim. inf	lim. sup	obs.val. (%)
A	3,3	6,7	3,4	0,1	9,2	79,6
B	3,1	12,3	9,2	0,3	19,2	87,8
C	11,4	27,8	16,3	2,4	40,0	91,8
D	32,8	44,9	12,0	14,5	53,9	93,9
E	1,2	8,2	7,1	0,3	13,5	85,7
F	1,3	6,2	4,9	0,1	9,9	89,8
G	32,9	41,0	8,2	0,5	47,2	91,8
Prom.	12,3	21,0	8,7	2,6	27,5	88,6

Tabla 9. Descriptivos Δh de la muestra 3 área local de zonas estables.

Los valores de las tablas 7,8 y 9 indican que para todos los DEM y a escala regional y local, y con la singularidad de la configuración de DEM "A" con menor superficie de cobertura y por ende menos registros y muestras con mayor cantidad de valores anómalos, las muestras cumplen con un estándar superior al 85% de observaciones válidas. Es importante señalar que aun cuando la muestra 1 con observaciones GNSS equivale al 8 % del tamaño de la muestra 2 con mediciones IceSat-2, su promedio de observaciones válidas es mayor, lo que confirma que el tamaño y diseño muestral es relevante para analizar los errores; de hecho, IceSat tiene mediciones a una distancia constante en una línea recta, lo que podría significar un patrón rígido y estratificado, mientras que los PCT GNSS tienen una distancia variable y sin un patrón de distribución. Este comportamiento se aprecia en las figuras 5 y 6: los valores de Δh de la muestra 1 GNSS no tienen una distribución homogénea en relación con la altura h y la pendiente, a diferencia de las muestras 2 y 3 IceSat-2 donde la altura determina la distribución de Δh . El promedio más bajo de Δh máximo es de la muestra 3 de la zona estable, que pudiera sugerir que las diferencias podrían explicarse por mayores pendientes e

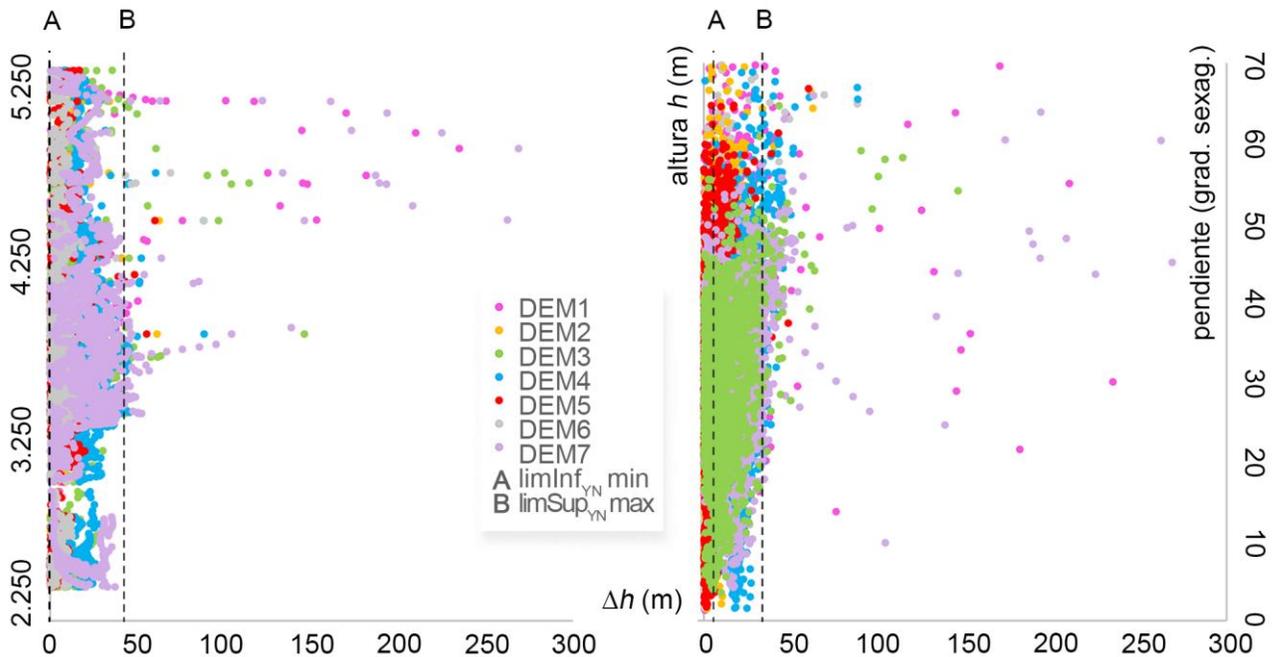


Figura 6 Distribución de diferencias de altura Δh para 7 DEM de la muestra 2 con 1.825 PCT IceSat-2 ATL06 . A la izquierda la variable dependiente en la altura h, y a la derecha la pendiente del terreno.

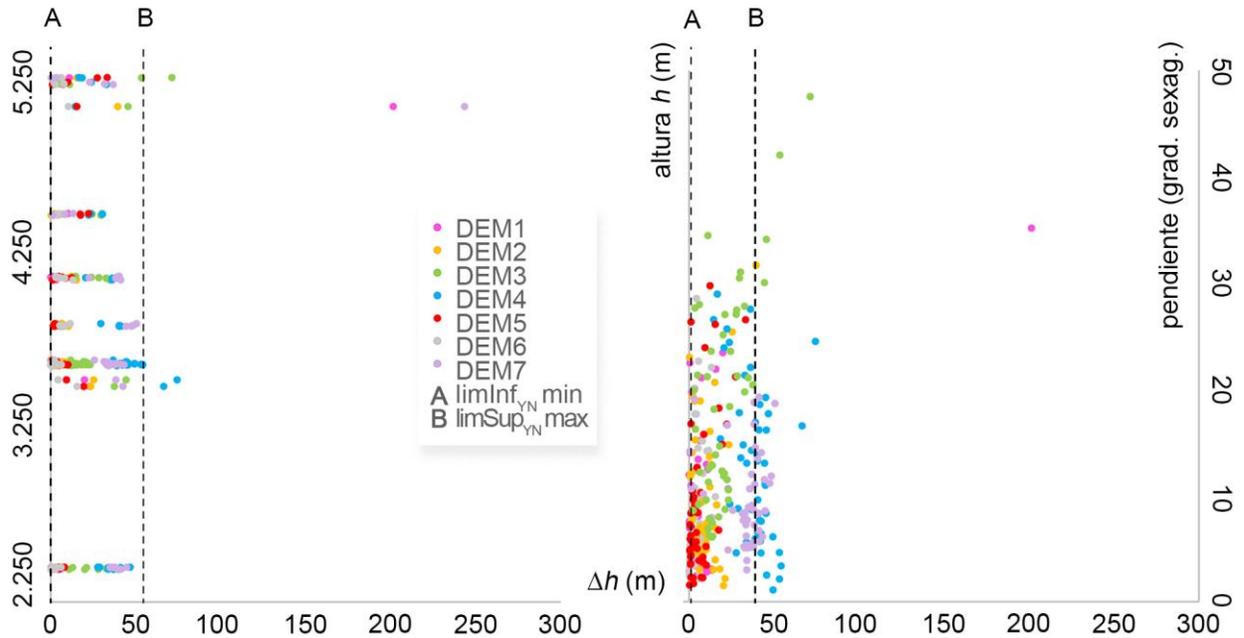


Figura 7 Distribución de diferencias de altura Δh para 7 DEM de la muestra 3 con 49 PCT IceSat-2 ATL06 de las zonas estables. A la izquierda la variable dependiente en la altura h , y a la derecha la pendiente del terreno.

inestabilidad del terreno. En el área estable Δh más bajo es para DEM AW3D30v21 y el más alto, DEM TamDEMx.

Estimación regional de la exactitud y precisión vertical.

En la tabla 10 se muestran los valores de los 5 indicadores de la exactitud y precisión ($RMSE_z$, $NRMSE_z$, $CVRMSE_z$, EMM, DAMN) calculados para los siete DEM disponibles.

id	N ($RMSE_z$)	CV ($RMSE_z$)	EMM (\hat{u})	DAMN (NMAD)	rank. (*)
A	0,0	0,0	17,6	17,4	1
B	0,0	0,0	18,7	17,6	6
C	0,0	0,0	22,4	18,8	7
D	0,0	0,0	17,2	16,4	4
E	0,0	0,0	16,3	15,6	3
F	0,0	0,0	15,2	15,7	2
G	0,0	0,0	17,2	17,9	5
M	0,0	0,0	17,8	17,1	

id	obs. (n)	exact. (m)	exact. (%)	prec. $RMSE_z$ (m)	prec. (%)
A	59	21,3	85,1	21,7	86,8
B	149	25,1	92,9	25,6	94,8
C	149	28,4	37,2	29,0	37,9
D	149	24,2	95,0	24,7	96,9
E	149	23,2	92,8	23,7	94,7
F	149	22,5	90,1	23,0	92,0
G	149	25,0	33,3	25,5	34,0
M	136,1	24,2	75,2	24,7	76,7

Tabla 10. Indicadores de la precisión y exactitud regional de DEM examinados (continúa). Donde M= media; obs. = número de observaciones; exac. = exactitud vertical; prec. = precisión vertical.

Tabla 10. Indicadores de la precisión y exactitud regional de DEM examinados (concluye). Donde rank. (*) = *ranking* de preferencia, estimado por la secuencia de orden de: prec. $RMSE_z$ (valores de < a >), exact. (%) (valores de > a <), y gsd px. (valores de < a >).

Los valores que se muestran en la tabla 10 indican que el DEM1 SRTM X-SAR solo registra datos para el 40% de la muestra de PCT, mientras que el resto de los modelos disponibles cumplen con el criterio de completitud para la comparación de la muestra. Los valores ordenados del error entre el valor observado (valor de altura h en PCT GNSS) y el valor estimado (valor de altura h en DEM) para los

7 DEM analizados, permiten afirmar que el DEM 1 SRTM X-SAR es el de mayor precisión vertical y exactitud. Sin embargo, y tal como se aprecia en la figura 4, su disposición de bandas cruzadas no lo hace útil para cálculos y comparaciones. Luego, la siguiente mejor opción es el DEM AW3D30 v.2.1, dada la precisión, exactitud y tamaño de pixel, cumpliendo con la completitud de las observaciones. Este resultado es consistente con la comparación de Alganci et al. (2018). La última opción es el DEM SRTM v3 de 3 arco/segundos, cuya resolución espacial o tamaño de pixel equivalente a 85m entrega datos gruesos para pct y puntos de amarre, dificultando su comparación para calcular diferencias de altura en el tiempo.

Estimación local de la exactitud y precisión vertical.

Los estadísticos de cada DEM se indican en las tablas 11 y 12. En la tabla 12, se muestran los resultados de 5 indicadores (RMSE_z, NRMSE_z, CVRMSE_z, EMM, DAMN) para los siete DEM disponibles de la muestra 2 que incluye las zonas inestables.

id	obs. (n)	exact. (m)	exact. (%)	prec. RMSE _{z(m)}	prec. (%)
A	1.825	31,8	78,7	32,4	77,1
B	1.825	15,4	57,2	15,8	58,4
C	1.825	31,4	41,1	32,1	41,9
D	1.825	43,6	58,5	44,4	57,4
E	1.825	14,7	58,7	15,0	59,9
F	1.825	14,5	57,8	14,8	59,0
G	1.825	57,7	76,9	58,9	78,5
M	1.825	29,9	61,3	30,5	61,7

Tabla 11. Indicadores de la precisión local de DEM para muestra 2 (continúa). Donde M= media.

id	N(RM SE _z)	CV (RMSE _z)	EMM (û)	DAMN (NMAD)	rank . (*)
A	0,0	0,0	14,5	15,8	5
B	0,0	0,1	11,9	6,3	3
C	0,0	0,0	23,9	21,9	4
D	0,0	0,0	42,0	14,4	6
E	0,0	0,1	11,2	9,8	2
F	0,0	0,1	10,7	9,8	1
G	0,0	0,0	45,0	24,2	7
M	0,0	0,0	22,7	14,6	

Tabla 11. Indicadores de la precisión local de DEM para muestra 2 (concluye). Donde M= media; rank.

(*) = *ranking* de preferencia, estimado por la secuencia de orden de: prec. RMSE_z (valores de < a >), exact. (%) (valores de > a <), y gsd px. (valores de < a >).

En la tabla 12 se exponen los indicadores locales de la muestra 3, que incluye solo la zona estable.

id	obs. (n)	exact. (m)	exact. (%)	prec. RMSE _{z(m)}	prec. (%)
A	49	29,1	85,8	29,7	84,1
B	49	11,8	43,6	12,0	44,5
C	49	24,0	31,4	24,5	32,0
D	49	39,8	64,0	40,6	62,7
E	49	9,6	38,2	9,8	39,0
F	49	5,2	20,8	5,3	21,2
G	49	48,6	64,8	49,6	66,1
M	49	24,0	49,8	50,0	0,0

Tabla 12. Indicadores de la precisión local de DEM para muestra 3 (continúa). Donde, M= media.

id	N(RM SE _z)	CV (RMSE _z)	EMM (û)	DAMN (NMAD)	rank . (*)
A	A	0,0	0,0	9,8	5
B	B	0,0	0,1	9,3	3
C	C	0,0	0,0	20,3	4
D	D	0,0	0,0	39,0	6
E	E	0,0	0,1	6,4	2
F	F	0,0	0,2	4,0	1
G	G	0,0	0,0	38,2	7
M	M	0,0	0,1	18,1	

Tabla 12. Indicadores de la precisión local de DEM para muestra 3 (concluye). Donde rank. (*) = *ranking* de preferencia, estimado por la secuencia de orden de: prec. RMSE_z (valores de < a >), exact. (%) (valores de > a <), y gsd px. (valores de < a >).

Al ordenar los valores de la tabla 12 comprobamos que para la muestra 2 del área local, el DEM de mejor precisión y exactitud es el DEM 6 Alos World 3d, seguido del DEM 5 AsterGDEMv3 19/08. Al ordenar los valores de la tabla 12 obtenidos para la muestra 3 del área local que considera sólo las zonas estables, se mantiene la tendencia anterior: el DEM de menor error y mayor exactitud es AW3D30, seguido de AsterGDEMv3 19/08. Para todos los DEM, el CV(RMSE_z) siempre tiene valores inversos y positivos a la precisión y

exactitud, con diferencias mínimas entre éstas. Es importante que el EMM se ubique siempre y para todos los DEM bajo la exactitud y precisión.

estimación de la calidad de un DEM, se debe comprobar: a) el tipo de distribución (frecuencia) del error Δh en torno a una o más medidas de

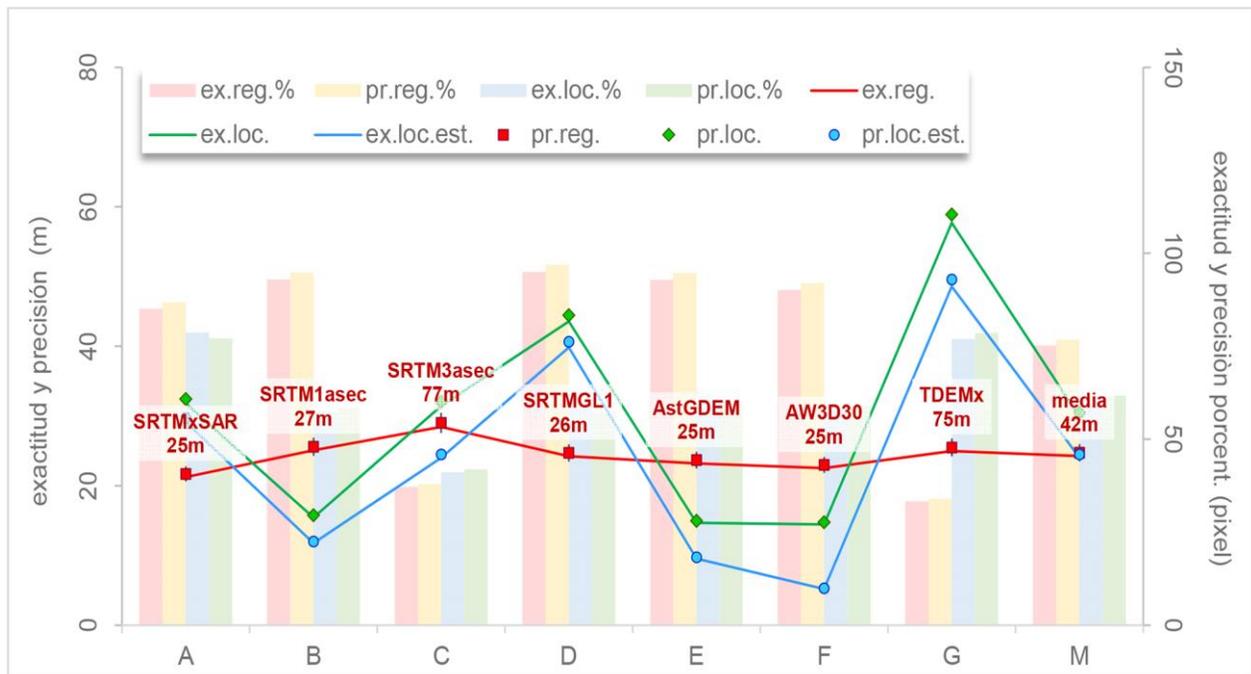


Figura 8 Indicadores de la precisión y exactitud de DEM examinados.

En la figura anterior que grafica la distribución de los indicadores de calidad de los DEM comparados, y del mismo modo que se constató para el área regional, exactitud y precisión en metros tienen valores muy similares y con rectas paralelas, señalado que los DEM son más exactos que precisos, y dependen del tamaño de píxel de éste: a menor tamaño mayor es la precisión.

DISCUSIÓN

Sobre los resultados obtenidos con PCT IceSat-2, creemos que pueden servir de referencia para otros ejercicios de validación en macrozonas de alta montaña del producto ATL06, a la espera de publicaciones oficiales del distribuidor sobre la precisión absoluta de las nuevas versiones del algoritmo. Sin embargo, el número y distribución de pct utilizados en este ejercicio, no permitieron analizar la afectación de las configuraciones de las pruebas estadísticas en los indicadores. En este sentido, se reafirma que previamente a cualquier

tendencias: y b) la ausencia de correlaciones entre el valor observado y estimado. Si la distribución no es paramétrica, se debe optar por una prueba acorde al supuesto. Respecto del número de observaciones, una muestra más grande no siempre asegura mayor precisión y exactitud de un DEM, lo que puede ser indicativo de la importancia de la distribución de los PCT en un área con relieve abrupto, y de la necesidad de segmentar una muestra y controlar los factores (pendiente, cambios en la altura, retornos incompletos de un pulso, oclusión y geometría deficiente de una solución GPS) que puedan crear valores anómalos (*outliers*). A diferencia de lo expuesto por otros autores, no recomendamos ningún ajuste de un DEM: ya sea degradación o gradación del tamaño de píxel de un DEM (resamplio), aplicación de filtros de remoción de ruido y del efecto “sal y pimienta” de los sets provenientes de observaciones SAR, normalización en base a un valor medio, cálculos de alturas por ajuste geoidal, o determinación de desplazamientos (*shifts*) verticales u horizontales para el co-registro. Todos ellos son una alteración de la condición original a la

que puede optar el usuario. En este sentido y para futuras validaciones, se debe considerar: 1) el número mínimo de PCT que determine el tamaño de una muestra, que a su vez depende del grado de exactitud esperable asociada a la incertidumbre asumida; 2) la exactitud vertical de las mediciones de los PCT, y que afecta la fiabilidad de la estimación de la precisión de un DEM. Es esperable que Chile cuente con un Banco de Mediciones Geodésicas, que incluya los datos de PCT generados por usuarios/productores de datos DEM.

CONCLUSIONES

Con una metodología sencilla y datos de acceso público, se evaluó la exactitud y precisión vertical a nivel regional y local en dos cuencas de los Andes centrales de Chile, de los datos de 7 modelos de elevación digital DEM con cobertura global. Mediciones de puntos de control GNSS con precisiones submétricas, son comparables con los datos de altura superficial de un láser satelital, con ciertas restricciones relacionadas con las condiciones de las mediciones GNSS en zonas rurales y abiertas con ausencia de vegetación arbórea, y con distancia espacial y temporal respecto de un evento sísmico cuya magnitud explique desplazamientos horizontales y verticales y reacomodo de la corteza. En zonas de media y alta montaña y a escala regional y local, el subgrupo de DEM generados con técnicas de mapeo tri-estereo (Aster GlobalDEM y AW3D30 v21) siempre es más exacto y más preciso, y tiene menor variación del error. Esta ventaja se explicaría por los ángulos oclusos que alcanza el modo de adquisición tri-estereo en comparación con el modo StripMap de TanDEMx y el bi-estático de SRTM-SAR C/X, y por la resolución espacial siempre menor de los DEM de este subgrupo. Esta constatación es coherente con las estimaciones de la precisión de DEM construidos con datos de sensores ópticos bi/tri-estereo de alta resolución espacial como SPOT5, CartoSat-1, Pléiades1-2-3, y WorldView1-2 en zonas montañosas (Alganci, Besol y Sertel, 2018; Reinartz et al., 2006; Breytenbach, 2016; Mukherjee et al., 2015). El DSM AW3D30 v21 es particularmente interesante pues su fuente son datos SAR y datos ópticos de alta resolución, lo que lo hace único pues en zonas de baja penetración por nubes o alta reprodispersión, capturó donde otros no lo hicieron.

Aún cuando el DSM ha sido degradado a 30 m para su distribución gratuita y abierta, la precisión se explica por el aporte de la señal robusta de los datos del sensor Prism a ~5m. A escala regional el DEM SRTM X-SAR es el de mayor exactitud y precisión vertical, con 21,3 m que alcanzan al 85% de exactitud; y $RMSE_z = 21,7$ m equivalente al 86,8% de precisión. Su uso se descarta en procedimiento que cubran un área mayor a 2.500 km², y justifica la opción como mejor alternativa al DEM Alos World 3D 30m v21. Esta validación es coherente con los resultados de comparaciones en otras regiones de mesetas elevadas y con abrupto relieve montañoso (Purinton y Bookhagen, 2018; Alganci, Besol y Sertel, 2018; Liu et al., 2019). A escala local, e independiente de si se trata de una zona estable o inestable, el DEM Alos World 3d confirma que es el de mayor exactitud y precisión vertical. De hecho, el $RMSE_z$ (m) y la exactitud calculados para la zona estable del orden ~5 m, igualando al que declara el proveedor. En último lugar de calidad de entre los DEM comparados, se ubica el DEM 6 TamDEMx, lo que podría comprobar que la precisión y exactitud son proporcionales a la resolución espacial del DEM.

Referencias

- ALGANCI, U., BESOL, B. y SERTEL, E., 2018. Accuracy Assessment of Different Digital Surface Models. *ISPRS International Journal of Geo-Information* [en línea], vol. 7, no. 3, pp. 114. ISSN 2220-9964. DOI 10.3390/ijgi7030114. Disponible en: <http://www.mdpi.com/2220-9964/7/3/114>.
- ASPRS, 2015. Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data ed.1 v.1.0.0. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol. 81, no. 3, pp. 1–26. ISSN 00991112. DOI 10.14358/PERS.81.3.A1-A26.
- BERTHIER, E., ARNAUD, Y., KUMAR, R., AHMAD, S., WAGNON, P. y CHEVALLIER, P., 2007. Remote sensing estimates of glacier mass balances in the Himachal Pradesh (Western Himalaya, India). *Remote Sensing of Environment*, vol. 108, no. 3, pp. 327–338. ISSN 00344257. DOI 10.1016/j.rse.2006.11.017.
- BERTHIER, E., ARNAUD, Y., VINCENT, C. y RÉMY, F., 2006. Biases of SRTM in high-mountain areas: Implications for the monitoring of glacier

volume changes. *Geophysical Research Letters* [en línea], vol. 33, no. 8, pp. 1–8. ISSN 00948276. DOI 10.1029/2006GL025862. Disponible en: http://etienne.berthier.free.fr/download/Berthier_et_al_GRL_2006_with_SM.pdf.

BIGDATA EARTH, 2017. A Survey and Clarification of DEM Vertical Accuracy. [en línea]. [Consulta: 10 agosto 2020]. Disponible en: <https://www.bigdataearth.com/elevation/dem-vertical-accuracy/>.

BLOKKER, G., 2019. Using ICESAT-2 to monitor Alpine Glaciers. [en línea]. Delft, The Netherlands: Disponible en: http://doris.tudelft.nl/~rlindenbergh/education/BEP_Report_GoofBlokker.pdf.

BREYTENBACH, A., 2016. Comparative accuracy evaluation of fine-scale global and local digital surface models: the Tshwane case study I. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 4, no. 2W1, pp. 211–222. ISSN 21949050. DOI 10.5194/isprs-annals-IV-2-W1-211-2016.

BURCHFIELD, D.R., PETERSEN, S.L., KITCHEN, S.G. y JENSEN, R.R., 2020. sUAS-Based Remote Sensing in Mountainous Areas: Benefits, Challenges, and Best Practices. *Papers in Applied Geography* [en línea], vol. 6, no. 1, pp. 72–83. ISSN 2375494X. DOI 10.1080/23754931.2020.1716385. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/23754931.2020.1716385>.

CHARRIER, R., ITURRIZAGA, L., CARRETIER, S. y REGARD, V., 2019. Evolución geomorfológica y glaciar de las hoyas de los ríos Maipo superior y Cachapoal en la Cordillera Principal Andina, Chile central (34°-35° S). *Andean geology*, vol. 46, no. 2, pp. 240–278. ISSN 0718-7106. DOI 10.5027/andgeov46n2-3108.

CRONEBORG, L., SAITO, K., MATERA, M., MCKEOWN, D. y AARDT, J. van, 2015. *Digital Elevation Models. A Guidance Note on how Digital Elevation Models are created and used – includes key definitions, sample Terms of Reference and how best to plan a DEM-mission* [en línea]. Washington, DC, USA: International Bank for Reconstruction and Development. Disponible en: <https://opendri.org/wp-content/uploads/2016/06/Digital-Elevation-Models-10-23-15-web.pdf>.

DE FRANÇA, L.L.S., PENHA, A. de L.T. da y DE CARVALHO, J.A.B., 2019. Comparison between absolute and relative positional accuracy assessment-a case study applied to digital elevation models. *Boletim de Ciências Geodésicas*, vol. 25, no. 1, pp. 1–22. ISSN 19822170. DOI 10.1590/s1982-21702019000100003.

DIRECCIÓN DE VIALIDAD, 2018. Manual De Carreteras. Vol. N°2. Procedimientos de Estudios Viales. . Santiago, Chile:

DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS, 2011. Inventario público de glaciares. [en línea]. Disponible en: <http://www.dga.cl/productosyservicios/mapas/Paginas/default.aspx#cuatro/>.

EARTH OBSERVATION CENTER, 2018. SRTM X-SAR Digital Elevation Models. . Berlin, Germany: EARTH OBSERVATION RESEARCH CENTER, 2019. ALOS Global Digital Surface Model (DSM) ALOS World 3D - 30m (AW3D30) Version 2.2. Product Description. [en línea]. Saitama, Japan: Disponible en: https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/aw3d30v22_product_e.pdf.

ENSSLE, F., FRITZ, A. y KOCH, B., 2015. Comparing Icesat/Glas based elevation heights with photogrammetric terrain heights from UAV-imagery on the east Tibetan plateau. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, vol. 40, no. 3W3, pp. 385–390. ISSN 16821750. DOI 10.5194/isprsarchives-XL-3-W3-385-2015.

FARR, T.G., ROSEN, P.A., CARO, E., CRIPPEN, R., DUREN, R., HENSLEY, S., KOBRICK, M., PALLER, M., RODRÍGUEZ, E., ROTH, L., SEAL, D., SHAFFER, S., SHIMADA, J., UMLAND, J., WERNER, M., OSKIN, M., BURBANK, D. y ALSDORF, D., 2007. The Shuttle Radar Topography Mission. *Reviews of Geophysics*, vol. 45, no. RG 2004, pp. 1–33. DOI 10.1029/2005RG000183.

FGDC (FEDERAL GEOGRAPHIC DATA COMMITTEE), 1998. Draft Geospatial Positioning Accuracy Standards. Part 3: National Standard for Spatial Data Accuracy. FGDC-STD-007.3-1998. *Canadian Anaesthetists' Society Journal* [en línea]. Reston, Virginia, USA: Disponible en: <https://www.fgdc.gov/standards/projects/FGDC->

- standards-projects/accuracy/part3/chapter3.
GRUBBS, F.E., 1950. Sample Criteria for Testing Outlying Observations. *The Annals of Mathematical Statistics* [en línea], vol. 21, no. 1, pp. 27–58. ISSN 0003-4851. DOI 10.1214/aoms/1177729885. Disponible en: https://projecteuclid.org/download/pdf_1/euclid.aoms/1177729885.
- HAWKER, L., BATES, P., NEAL, J. y ROUGIER, J., 2018. Perspectives on Digital Elevation Model (DEM) Simulation for Flood Modeling in the Absence of a High-Accuracy Open Access Global DEM. *Frontiers in Earth Science* [en línea], vol. 6, no. December, pp. 1–9. ISSN 2296-6463. DOI 10.3389/feart.2018.00233. Disponible en: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/feart.2018.00233/full>.
- HÖHLE, J. y HÖHLE, M., 2009. Accuracy assessment of digital elevation models by means of robust statistical methods. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* [en línea], vol. 64, no. 4, pp. 398–406. ISSN 09242716. DOI 10.1016/j.isprsjprs.2009.02.003. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2009.02.003>.
- HUBBARD, B. y GLASSER, N.F., 2005. *Field Techniques in Glaciology and Glacial Geomorphology*. 1st. Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons, Ltd. ISBN 9780470844267.
- INSTITUTO GEOGRAFICO MILITAR DE CHILE, 2018. Sistema de referencia geodésico para Chile SIRGAS-Chile, época 2016.0. [en línea]. Santiago, Chile: Disponible en: http://www.ide.cl/images/Publicaciones/Documentos/SISTEMA_REFERENCIA_GEODESICO_PARA_CHILE.pdf.
- INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN, 2014. *NCh-ISO 19157/2014 Información geográfica - Calidad de datos* [en línea]. 2014. Chile: s.n. Disponible en: http://ecommerce.inn.cl/Ficha_Producto/?p=NCh-ISO19157:2014.
- INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN, 2016. Aplicación de Normas Chilenas de información geográfica. Documento técnico. [en línea]. Santiago, Chile: Disponible en: [http://www.ide.cl/images/Publicaciones/Documentos/LibroNormasIG\(V.2\).pdf](http://www.ide.cl/images/Publicaciones/Documentos/LibroNormasIG(V.2).pdf).
- JAPAN SPACE SYSTEMS, 2019. Aster GDEM. *Release of ASTER GDEM Version 3* [en línea]. [Consulta: 10 agosto 2020]. Disponible en: <https://ssl.jspacesystems.or.jp/ersdac/GDEM/E/4.html>.
- JEDLICKA, K., 2009. Accuracy of Surface Models Acquired from Different Sources - Important Information for Geomorphological Research. *Geomorphologia Slovaca Et Bohemica*, vol. 1, pp. 17–28.
- KARGEL, J.S., LEONARD, G.J., BISHOP, M.P., KÄÄB, A. y RAUP, B.H., 2014. *Global Land Ice Measurements from Space* [en línea]. 1st. Chichester, West Sussex, United Kingdom: Praxis Publishing. ISBN 978-3-540-79818-7. Disponible en: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-540-79818-7>.
- KIM, S., 2015. *The Estimation of the Variogram in Geostatistical Data with Outliers* [en línea]. S.I.: Okayama University. Disponible en: http://ousar.lib.okayama-u.ac.jp/files/public/5/53442/20160528121035248979/K0005160_fulltext.pdf.
- LAKSHMI, S.E. y YARRAKULA, K., 2018. Review and critical analysis on digital elevation models. *Geofizika* [en línea], vol. 35, no. 2, pp. 129–157. ISSN 03523659. DOI 10.15233/gfz.2018.35.7. Disponible en: <https://hrcak.srce.hr/216905>.
- LEIDMAN, S.Z., RENNERMALM, Å.K., BROCCOLI, A.J., VAN AS, D., VAN DEN BROEKE, M.R., STEFFEN, K. y HUBBARD, A., 2020. Methods for Predicting the Likelihood of Safe Fieldwork Conditions in Harsh Environments. *Frontiers in Earth Science* [en línea], vol. 8, no. July, pp. 260. DOI 10.3389/feart.2020.00260. Disponible en: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/feart.2020.00260/full>.
- LINDER, W., 2016. *Digital Photogrammetry: A Practical Course*. Fourth. Düsseldorf: Springer. ISBN 9783662504628.
- LIU, K., SONG, C., KE, L., JIANG, L., PAN, Y. y MA, R., 2019. Global open-access DEM performances in Earth's most rugged region High Mountain Asia: A multi-level assessment. *Geomorphology* [en línea], vol. 338, no. April, pp. 16–26. ISSN 0169555X. DOI 10.1016/j.geomorph.2019.04.012.

- Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.04.012>. 10.1016/j.rse.2019.111325. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111325>.
- LPDAAC LAND PROCESSES DISTRIBUTED ACTIVE ARCHIVE CENTER, 2015. The Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Collection User Guide. [en línea]. Sioux Falls,SD,USA: Disponible en: https://lpdaac.usgs.gov/documents/179/SRTM_User_Guide_V3.pdf.
- MARKUS, T., NEUMANN, T.A., MARTINO, A., ABDALATI, W., BRUNT, K., CSATHÓ, B., FARRELL, S., FRICKER, H., GARDNER, A., HARDING, D., JASINSKI, M., KWOK, R., MAGRUDER, L., LUBIN, D., LUTHCKE, S., MORISON, J., NELSON, R., NEUENSCHWANDER, A., PALM, S., POPESCU, S., SHUM, C.K., SCHUTZ, B.E., SMITH, B., YANG, Y. y ZWALLY, J., 2017. The Ice, Cloud, and land Elevation Satellite-2 (ICESat-2): Science requirements, concept, and implementation. *Remote Sensing of Environment* [en línea], vol. 190, no. March, pp. 260–273. ISSN 00344257. DOI 10.1016/j.rse.2016.12.029. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2016.12.029>.
- MUKHERJEE, Samadrita, MUKHERJEE, Sandip, BHARDWAJ, A., MUKHOPADHYAY, A., GARG, R.D. y HAZRA, S., 2015. Accuracy of cartosat-1 DEM and its derived attribute at multiple scale representation. *Journal of Earth System Science*, vol. 124, no. 3, pp. 487–495. ISSN 0973774X. DOI 10.1007/s12040-015-0557-x.
- NASA-METI SC. TEAMS, 2019. NASA and METI Release ASTER Global DEM Version 3. *LPDAAC-USGS* [en línea]. [Consulta: 10 agosto 2020]. Disponible en: <https://lpdaac.usgs.gov/news/nasa-and-meti-release-aster-global-dem-version-3/>.
- NEUMANN, T.A., MARTINO, A.J., MARKUS, T., BAE, S., BOCK, M.R., BRENNER, A.C., BRUNT, K.M., CAVANAUGH, J., FERNANDES, S.T., HANCOCK, D.W., HARBECK, K., LEE, J., KURTZ, N.T., LUERS, P.J., LUTHCKE, S.B., MAGRUDER, L., PENNINGTON, T.A., RAMOS-IZQUIERDO, L., REBOLD, T., SKOOG, J. y THOMAS, T.C., 2019. The Ice, Cloud, and Land Elevation Satellite – 2 mission: A global geolocated photon product derived from the Advanced Topographic Laser Altimeter System. *Remote Sensing of Environment* [en línea], vol. 233, no. July, pp. 111325. ISSN 00344257. DOI 10.1016/j.rse.2019.111325.
- NUTH, C. y KÄÄB, A., 2011. Co-registration and bias corrections of satellite elevation data sets for quantifying glacier thickness change. *The Cryosphere*, vol. 5, no. 1, pp. 271–290. ISSN 19940416. DOI 10.5194/tc-5-271-2011.
- PATEL, A., KATIYAR, S.K. y PRASAD, V., 2016. Performances evaluation of different open source DEM using Differential Global Positioning System (DGPS). *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science* [en línea], vol. 19, no. 1, pp. 7–16. ISSN 20902476. DOI 10.1016/j.ejrs.2015.12.004. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejrs.2015.12.004>.
- PELLIKA, P.K.E. y REES, W.G., 2011. *Remote sensing of glaciers: techniques for topographic, spatial, and thematic mapping of glaciers*. 1st. Boca Raton, FL, USA: CRC Press Taylor & Francis Group. ISBN 978-0-203-85130-2.
- PITTE, P., BERTHIER, E., MASIOKAS, M.H., CABOT, V., RUIZ, L., FERRI HIDALGO, L., GARGANTINI, H. y ZALAZAR, L., 2016. Geometric evolution of the Horcones Inferior Glacier (Mount Aconcagua, Central Andes) during the 2002-2006 surge. *Journal of Geophysical Research F: Earth Surface*, vol. 121, no. 1, pp. 111–127. ISSN 21699011. DOI 10.1002/2015JF003522.
- PURINTON, B. y BOOKHAGEN, B., 2018. Measuring decadal vertical land-level changes from SRTM-C (2000) and TanDEM-X (1/4 2015) in the south-central Andes. *Earth Surface Dynamics*, vol. 6, no. 4, pp. 971–987. ISSN 2196632X. DOI 10.5194/esurf-6-971-2018.
- REINARTZ, P., MÜLLER, R., LEHNER, M. y SCHROEDER, M., 2006. Accuracy analysis for DSM and orthoimages derived from SPOT HRS stereo data using direct georeferencing. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 60, no. 3, pp. 160–169. ISSN 09242716. DOI 10.1016/j.isprsjrs.2005.12.003.
- SISTEMA NACIONAL DE INFORMACIÓN TERRITORIAL, 2018. *Geodesia en Chile, teoría y aplicación del Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas (SIRGAS)* [en línea]. 1. Santiago, Chile: Sistema Nacional de Coordinación de Información Territorial. Disponible en:

<http://www.ide.cl/descargas/Geodesia-en-Chile.pdf>.

SMITH, B., FRICKER, H.A., GARDNER, A.S., SIEGFRIED, M.R., ADUSUMILLI, S., CSATHÓ, B., HOLSCHUH, N., NILSSON, J. y PAOLO, F., 2019. ATLAS/ICESat-2 L3A Land Ice Height User Guide, Version 2. [en línea]. Boulder, Colorado USA: Disponible en: <https://nsidc.org/data/ATL06>.

SMITH, B., FRICKER, H.A., GARDNER, A.S., SIEGFRIED, M.R., ADUSUMILLI, S., CSATHÓ, B., HOLSCHUH, N., NILSSON, J., PAOLO, F. y TEAM, Ices.-2 S., 2020. ATLAS/ICESat-2 L3A Land Ice Height User Guide, Version 3. [en línea]. Boulder, Colorado USA: Disponible en: <https://nsidc.org/data/ATL06/versions/3>.

SMITH, B., FRICKER, H.A., HOLSCHUH, N., GARDNER, A.S., ADUSUMILLI, S., BRUNT, K.M., CSATHÓ, B., HARBECK, K., HUTH, A., NEUMANN, T.A., NILSSON, J. y SIEGFRIED, M.R., 2019. Land ice height-retrieval algorithm for NASA's ICESat-2 photon-counting laser altimeter. *Remote Sensing of Environment* [en línea], vol. 233, no. July, pp. 111352. ISSN 00344257. DOI 10.1016/j.rse.2019.111352. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111352>.

SMITH, B., HANCOCK, D., HARBECK, K., ROBERTS, L., NEUMANN, T.A., BRUNT, Kelly, FRICKER, H.A., GARDNER, A.S., SIEGFRIED, M.R., ADUSUMILLI, S., CSATHÓ, B., HOLSCHUH, N., NILSSON, J. y PAOLO, F., 2019. Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) for Land Ice Along-Track Height Product (ATL06). ICE, CLOUD, and Land Elevation Satellite-2 (ICESat-2) Project. [en línea]. Greenbelt, Maryland: Disponible en: https://icesat-2.gsfc.nasa.gov/sites/default/files/page_files/ICESat2_ATL06_ATBD_r002_v2.pdf.

SMITH, B., HANCOCK, D., HARBECK, K., ROBERTS, L., NEUMANN, T.A., BRUNT, Kelly M., FRICKER, H.A., GARDNER, A.S., SIEGFRIED, M.R., ADUSUMILLI, S., CSATHÓ, B., HOLSCHUH, N., NILSSON, J. y PAOLO, F., 2019. Algorithm Theoretical Basis (ATBD) for Land Ice Along-Track Height (ATL06) Release 002. ICE, CLOUD, and Land Elevation Satellite-2 (ICESat-2) Project. [en línea]. Greenbelt, Maryland USA: Disponible en: <https://icesatiimis.gsfc.nasa.gov>.

SORIA MOLINA, B.M., 2014. *Metodología para ejecución y control de calidad para ortofotos, mediante combinación de sensor digital con LiDAR en zonas rurales*. S.I.: Universidad Politécnica de Madrid.

SULZER, W. y KOSTKA, R., 2007. Mt. Aconcagua: a challenge for remote sensing mapping activities in the Andes. *5th ICA Mountain Cartography Workshop* [en línea]. Bohinj, Slovenia: s.n., pp. 229–235. Disponible en: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.482.7466&rep=rep1&type=pdf>.

TACHIKAWA, T., KAKU, M. y IWASAKI, A., 2015. ASTER GDEM Version 3 Validation Report. [en línea]. Tokyo, Japan: Disponible en: https://ssl.jspacesystems.or.jp/ersdac/GDEM/ver3/Validation/Summary_GDEM3_validation_report_2019.pdf.

TADONO, T., NAGAI, H., ISHIDA, H., ODA, F., NAITO, S., MINAKAWA, K. y IWAMOTO, H., 2016. Generation of the 30 m-mesh global digital surface model by Alos Prism. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* [en línea], vol. XLI-B4, no. July, pp. 157–162. ISSN 2194-9034. DOI 10.5194/isprsarchives-XLI-B4-157-2016. Disponible en: <http://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XLI-B4/157/2016/isprs-archives-XLI-B4-157-2016.pdf>.
TARRIÓ MOSQUERA, J.A., ARAVENA RAMIREZ, S. y SILVA VALDICIA, C., 2017. Asesoría en Geodesia y Cartografía aplicada a SIG. . Santiago, Chile:

TEDESCO, M., 2015. *Remote Sensing of the Cryosphere*. The Cryosp. Chichester, West Sussex, United Kingdom: Wiley Blackwell. ISBN 9781118368855.

TUKEY, J.W., 1993. *Exploratory Data Analysis: Past, Present and Future* [en línea]. S.I.: s.n. Disponible en: <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a266775.pdf>.

WESSEL, B., 2016. TanDEM-X Ground Segment DEM Products Specification Document. *Public Document TD-GS-PS-0021* [en línea]. Oberpfaffenhofen, Germany: Disponible en: https://elib.dlr.de/108014/1/TD-GS-PS-0021_DEM-Product-Specification_v3.1.pdf.